

投稿論文
Paper
(In Japanese)

シドニー・ハーバートンネル沈埋函の 外洋曳航に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON OPEN-SEA TOWING OF THE IMMERSED TUBE UNIT FOR THE SYDNEY HARBOUR TUNNEL

新田良典*・斉藤尚武**・山口正記***・富樫宏由****

By Yoshinori NITTA, Naotake SAITO, Masaki YAMAGUCHI and Hiroyoshi TOGASI

The Sydney Harbour Tunnel for a solution to Sydney's cross-harbour traffic problem is now under construction by immersed tube (IMT) tunnel method, on the east side of the existing Harbour Bridge. IMT units are cast in drydock at a distance of 90 kilometers from Sydney and towed to Sydney Harbour to be sunk. In this towing situation, IMT units are encountered severe waves because of open-sea towing. Therefore, stability of the unit against the wave-induced motions is the principal subject. This paper deals with the characteristic of unit motions and towing force based on model towing tests, and is considered to be applicable in real works.

Keywords: open-sea towing, immersed tube tunnel, model towing tests

1. ま え が き

オーストラリア最大の都市シドニーは、ポート・ジャクソン湾を囲むように開けた人口350万を擁する経済、文化、商業の中心地である。このポート・ジャクソン湾を横断するハーバー・ブリッジは市民の足として欠かせない交通手段であるが、近年の交通混雑は激しく、1986年の交通量調査によれば、朝夕のピーク時には通行量14500台/時にのぼり、1991年には橋の設計通行量15200台/時をはるかに超える22000台/時に達すると予測されている。

このため、湾横断ルートの交通混雑緩和を図り、New South Wales州の2000年までの主要道路整備計画の一環として、シドニー・ハーバートンネルが企画され、現在、建設が進められている。このトンネルは図-1に示

すようにシドニー・ハーバーブリッジの東側で湾を横断し、湾横断部は沈埋トンネル工法が採用されている。

この工事の大きな特徴は、沈埋函を函体製作ヤードであるドライドックから沈設地点のシドニーまで約90kmの外洋を曳航することにある。今までに施工された沈埋トンネルの函体曳航は比較的海象条件の良い静穏な湾内で行われてきたが、今回のように厳しい海象条件下で、かつ長時間の外洋曳航は世界でも初めてのケースである。また、浮遊時の乾舷が小さい鉄筋コンクリート製の沈埋函であるため、曳航時の高波浪に対する函体の動揺安定性が重要な検討課題であった。

そこで、曳航作業着手に先立ち、曳航時の函体の挙動を理論計算で予測を行うとともに、外洋曳航に対する可能性および問題点を探るための模型による曳航実験を行った。その結果、乾舷を十分に有する浮体構造物にはみられない動揺特性が確認された。

本稿では、シドニー・ハーバートンネル工事の概要と曳航実験を通じて明らかとなった函体の挙動および索張力結果について報告する。

2. 工事概要

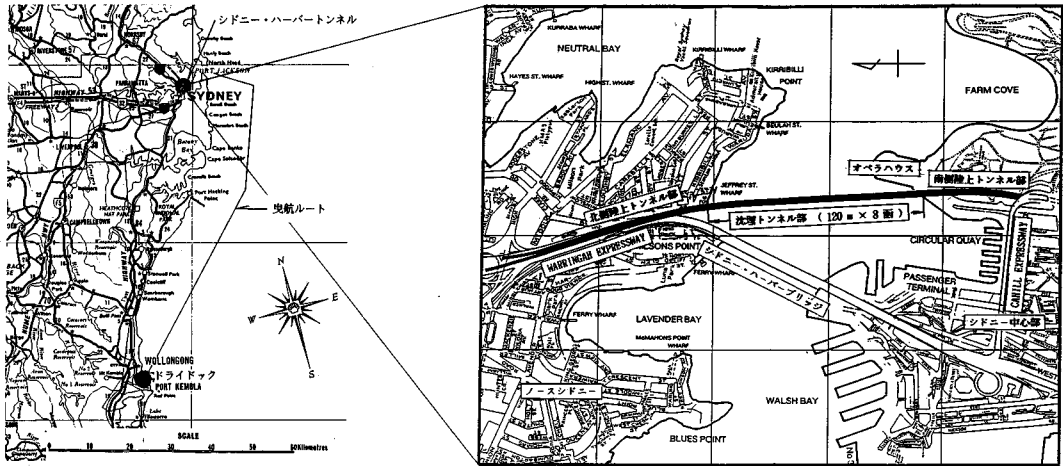
シドニー・ハーバートンネルのルートは、図-1に示すようにノースシドニーのWarringah高速道路と市中

* 正会員 (株)熊谷組技術研究所水理研究部主任(現・長崎大学大学院海洋生産科学研究科)
(〒300-22 つくば市鬼ヶ窪下山1043)

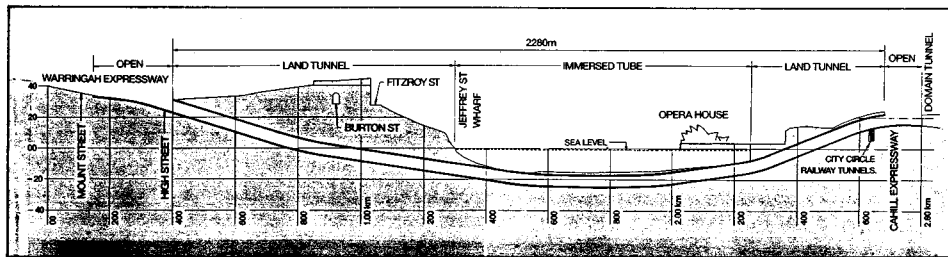
** 正会員 (株)熊谷組豪州支店シドニー・ハーバートンネル工事所長(100 Arthur St. North Sydney N.S.W 2060 Australia)

*** 正会員 (株)熊谷組技術研究所水理研究部部長
(〒300-22 つくば市鬼ヶ窪下山1043)

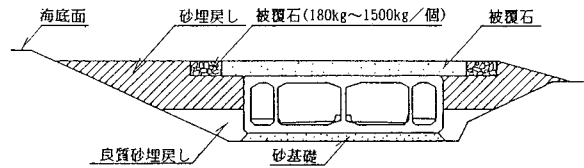
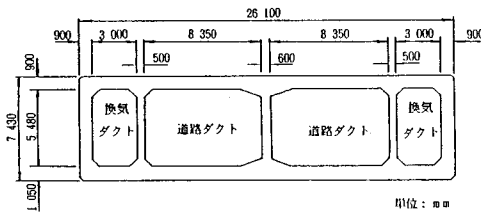
**** 正会員 工博 長崎大学工学部教授 土木工学科
(〒852 長崎市文教町1-14)



図一 建設地点とトンネルルート



図二 トンネル縦断面図



図三 トンネル横断面図

心部東側の Cahill 高速道路をほぼ直線的に結ぶ、南行、北行各 2 車線の自動車専用道路トンネルである。トンネル総延長は約 2.3 km で、このうち、湾を横断する約 1 km 区間の沈埋トンネル部とその両端の陸上トンネルおよび湾北側に設けられる換気建物より構成されている。

沈埋トンネルは、沈埋函 1 函の大きさが、幅 26.1 m、高さ 7.43 m、長さ 119.9 m、重量が 23 000 トンの鉄筋コンクリート製で、これを 8 函つないで建設される。

図一に函体の標準断面形状を示す。

函体は、建設場所のシドニーから約 90 km 南方に離れた Port Kembla のドライドックで、4 函ずつ 2 回に分けて製作される。製作後、函体を沈設地点まで曳航し、あらかじめ浚渫したトレンチに沈設したのち、函相互の

結合、埋め戻しを行い海底トンネルを建設する。

本プロジェクトの主要工事は次のとおりである。

(1) ドライドック

寸法；幅 104 m、長さ 315 m、深さ -8.5 m

1 か所

掘削土量；820 000 m³

(2) 沈埋トンネル

延長；960 m

寸法；幅 26.1 m、高さ 7.43 m、長さ 119.9 m

8 函

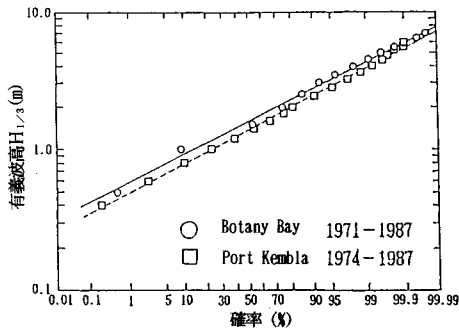
(3) トレンチ浚渫工浚渫土量；737 000 m³

(4) 陸上トンネル

・山岳トンネル



写真—1 沈埋函製作状況



図—4 有義波高の再起確率分布

断面: 80.2 m² × 上下線 2本 1933.5 延 m

- 開削トンネル 476.7 延 m
- (5) 換気建物 (地下式) 1 か所
- (6) 交通管制および管理ビル 1 か所

なお、沈埋式道路トンネルはオーストラリアでは初めてのことであったが、事前調査、計画・設計および各種検討を十分に積み重ね、1987年6月着工の運びとなった。トンネルの供用開始は1992年9月を予定している。

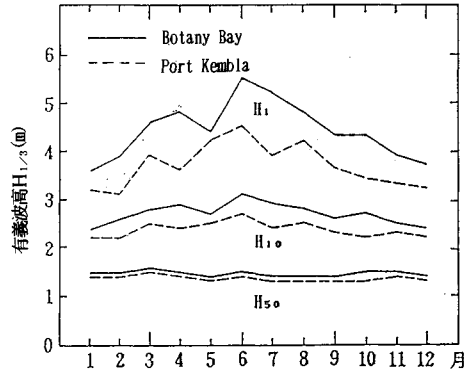
3. 曳航計画上の特徴および検討課題

(1) 海象条件

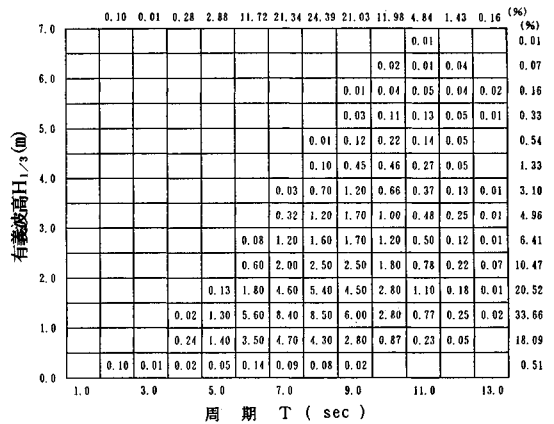
図—4は、曳航ルートのうち、ドライドック建設地点のPort Kemblaとシドニーの近接地であるBotany Bayの2か所における有義波高の再起確率分布¹⁾を示したものである。この図より、未超過確率50%の波高は両者ともほぼ1.5m以下の波で、4mを超える波の超過確率は2%程度である。

図—5は未超過確率50、10、1%に対応する波高を月別に整理したもので、50%の波高は年間を通じて変化なく1.5m程度であり、10%に対応する波高は曳航時期の夏季(12, 1, 2月)で2.5~3mである。

次に、有義波高と有義波周期の結合頻度分布を図—6



図—5 未超過確率に対する月別の有義波高



図—6 波高と周期の結合頻度分布

表—1 沈埋函曳航例

トンネル名称	所在地	曳航距離 (km)	曳航速度 (ノット)	有義波高 (m)	曳航時間 (hr)	乾舷 (m)
東京港第一航路	(日) 東京港	5.5	2	0.2以下	1.5	0.1
東京港第二航路	(日) 東京港	2.7	1.5		1	0.1
台湾・高雄	(台) 高雄港	2	1.5	0.2以下	1	0.15
香港第二クロスハーバー	(香港) ビクトリア港	5.5	2	0.5以下	1.5	0.2
シドニー・ハーバー	(豪) ジャクソン湾	90	2~3	3.0以下	30	0.6

に示す。この図より、有義波高総数の約90%は波周期6~10秒の間に分布していることがわかる。なお、夏季の波の主方向はNE~SEである。

(2) 曳航条件の特徴

沈埋函は図—1に示すようにドライドックから沈設地点までの海上をタグボートで曳航される。曳航は気象条件の良い静穏の日を選んで行いが、(1)の海象条件からもわかるように、夏場の曳航時期においても厳しい波浪条件下での作業となることが予測される。

表—1は今までに施工された鉄筋コンクリート製沈埋函の主な曳航例と本工事で想定している曳航条件とを比

較したものである。これより、本曳航条件の特徴は大略次のとおりである。

- a) 従来の施工例は波高 0.5 m 以下の静穏な湾内で行われていたのに対し、今回は有義波高 $H_{1/3} = 1.5 \sim 3 \text{ m}$ の厳しい外洋を曳航すること。
- b) 曳航距離約 90 km, 所要時間約 30 時間と、鉄筋コンクリート製の函体としては長時間の曳航作業となること。
- c) 一般に、沈埋函は沈設時の沈設荷重をできるだけ抑えるため乾舷を小さくしているが、今回は波浪による水の被りを極力避けるため、乾舷を約 60 cm に調整したこと。

(3) 曳航計画上の検討課題

曳航計画は曳船の選定、函体および曳航装置（曳索、ボラード、ブラケット等）の強度、気海象予測等多くの検討項目を考慮し策定されるが、今回のような外洋曳航は事例もなく、初めての経験であるため、計画上いくつかの不明確な事柄が残された。特に、高波浪による函体の挙動および索張力を把握することは、上記項目の検討および外洋曳航の可能性も含め重要な課題であった。

以下に、曳航計画上の検討課題を記す。

- a) 函体の安定性の確認および操船のための、波浪中曳航時における函体の挙動および動揺量
- b) 曳船の選定、曳航装置の決定のための、曳索に作用する力
- c) 気海象予測および曳航所要時間を把握するための曳航実施条件

4. 曳航実験

波浪中における函体の動揺特性については、境界要素法の一つである特異点分布法²⁾による理論計算で予測を行ったが、函体の波浪に対する乾舷が小さいことにより理論計算では説明できない現象が予測されるため、より精度の高い検討を加えるための模型による曳航実験を行った。

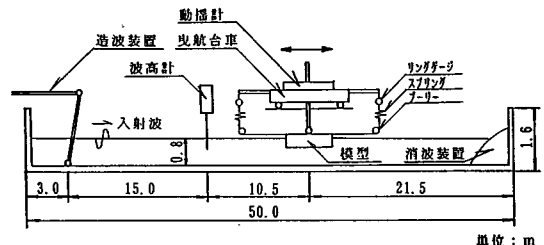
(1) 実験方法

実験は長さ 50 m, 幅 2 m, 高さ 1.6 m の水槽で実施した。実験装置の概要を図一七に示す。実験の縮尺は 1/100 とし、フルードの相似則に従い模型を製作した。模型の諸元を表一に示す。

実験は、下記の 3 種類について行い、模型重心位置の運動および曳航索張力を計測した。

a) 波浪中動揺実験

波浪中における函体の基本的な運動特性を調べるため、模型の重心位置真上にポテンショ式の 6 成分動揺計を取り付け、函体の運動を計測した。なお、模型は運動に影響を与えない程度の緩いスプリング（ばね定数 $k =$



図一七 実験装置

単位: m

表一 模型諸元

項目	沈埋函寸法 (m)				慣動半径 (m)			排水量
	長さ	幅	高さ	乾舷	ロール	ピッチ	ヨウ	
実機	119.9	26.1	7.43	0.61	8.80	34.27	35.45	21,500 tf
模型	1.199	0.261	0.074	0.006	0.088	0.343	0.355	21.5 kgf

表三 実験条件

項目	波高 H (m)	周期 T (秒)	波向 θ ($^\circ$)	曳航速度 V (ノット)	水深 D (m)
波浪中動揺実験	2.3, 4	7.8, 9.10	0.45, 90	—	80
静水中曳航実験	—	—	—	1.2, 3.4	80
波浪中曳航実験	2.3, 4	7.8, 9.10	0.180	2.4	80

*なお、上記の値は、実機換算値である。

0.135 kgf/m) で係留した。

b) 静水中曳航実験

静水中曳航時の函体の抗力を求めるため、模型を細いワイヤで曳航台車に取り付け、台車を一定速度で走行させたときのワイヤに作用する張力をリングゲージ（容量 800 gf）で計測した。

c) 波浪中曳航実験

波浪中での函体の運動および索張力に及ぼす曳航速度の影響を調べるため、模型をワイヤ、スプリングで曳航台車に取り付け、台車を前進（向かい波）、後進（追い波）させ入射波と計測位置で出会うよう実験した。函体の姿勢の変化および運動は動揺計で、索張力はリングゲージで計測した。

各実験とも実験波は規則波を用いて行い、波浪条件は現地スケールで表一のように設定した。実験の全体ケース数は 80 ケースであった。

図一八に今回の実験およびデータを整理するうえで用いた座標系と入射波の波向きに対する 6 自由度の運動系の定義を示した。

(2) 解析方法

計測器より検出されたアナログデータをサンプリング周波数 20 Hz で A/D 変換した後、前後揺れ、上下揺れの各運動をセンサー位置と運動を考える着目点の距離に

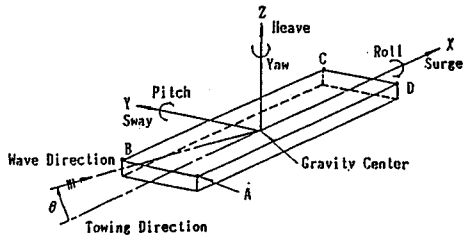


図-8 運動系の定義

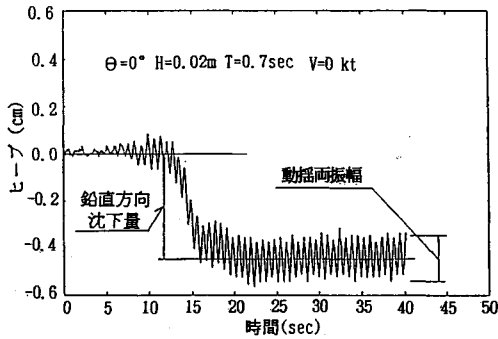


図-9 ヒープの実験記録

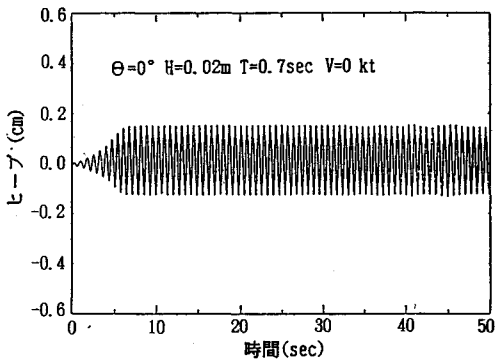


図-10 ヒープの計算結果

より座標変換を行い、模型重心位置および甲板上4隅での運動量を求めた。変換後のおおのこの運動について図化処理を行い、その波形から動揺量を読み取った。図-9にその一例を示す。ここで、動揺量は動揺の両振幅値を、鉛直沈下量は静水時の初期値(重心位置)から周期的な運動を繰り返す動揺成分の中心位置までの距離とした。なお、索張力も同様に、リングゲージで計測したデータを図化処理した波形から読み取った。

(3) 結果と考察

a) 動揺特性

実験の結果、入射波高に対して乾舷を十分に有する浮体構造物と沈埋函のように乾舷の小さい構造物では、動揺特性に顕著な違いがみられた。

図-9は模型重心位置での縦波中 ($\theta=0^\circ$) における

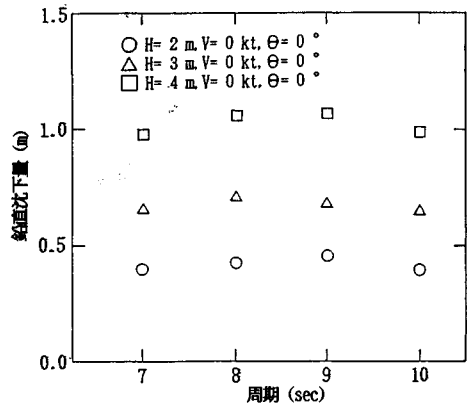


図-11 鉛直沈下量

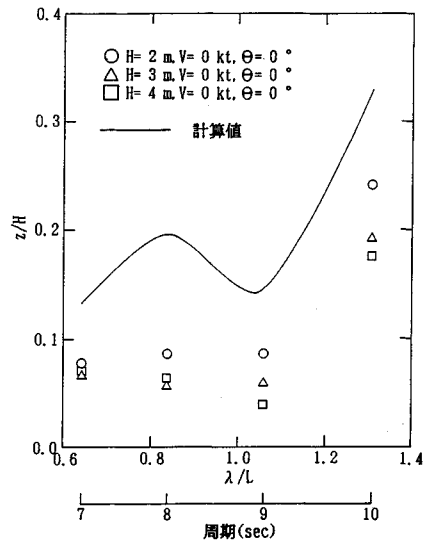


図-12 ヒープの無次元値

ヒープの変位の実験記録である。函体は初期状態から徐々に沈下し、ある深さでつり合い状態となり周期的な運動を繰り返していることがわかる。これは、沈埋函の乾舷が小さいため、その上面に波が被り沈下していくものと思われる。図-10は実験と同一条件で行った特異点分布法による計算結果の時系列である。この計算結果は常に浮体の状態を保つような、つまり乾舷を十分に有する構造物の動揺特性に対応しており、波被り現象は考慮していない。このように、入射波高に対する乾舷の大小で構造物の動揺特性は全く異なることがわかる。

図-11は波高と波周期の違いによる鉛直沈下量をプロットしたもので、縦軸、横軸とも実機換算した値である。沈下は波高が増大するにつれ大きくなるが今回の実験範囲の波周期には影響されないようである。

図-12, 13, 14はヒープ、ピッチ、サージの動揺振

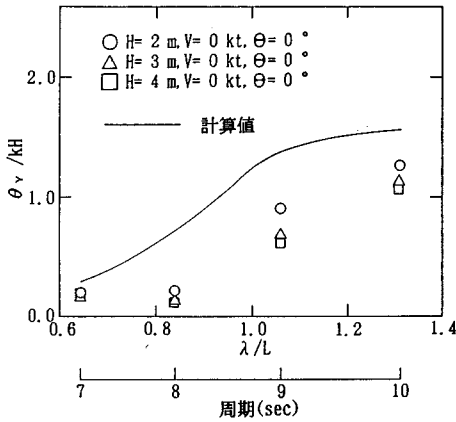


図-13 ピッチの無次元値

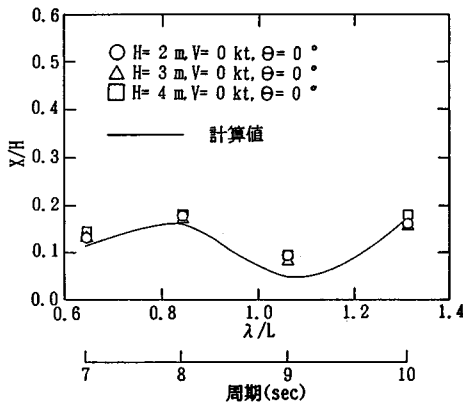


図-14 サージの無次元値

幅値の実験結果と計算結果をプロットしたものである。横軸に波長・函体長比 λ/L 、縦軸には動揺の両振幅を波高 H または最大波傾斜角 kH ($k = \pi/\lambda$) で除して無次元化した値である。通常、乾舷を十分に有する浮体の場合、微小振幅波の範囲では、動揺量は波高に比例して線形的に大きくなるが、今回のケースではヒープ、ピッチに関して動揺振幅の波高に対する線形性はみられない。これは、波高が大きくなると函体上面に波が被る割合も大きくなり、このため動揺が抑制されたものと考えられる。

次に、実験値と計算値を比較すると、ヒープ、ピッチの計算値は動揺量を過大に評価していることがわかる。この相違は、計算では函体が没水する際の境界条件の不連続性や函体上面に載る水の量および水波の非線形性が考慮されていないためである。現在一般に使用されている船舶や海洋構造物の波浪中運動推定理論は大半が波および浮体の運動は微小であるという線形理論を採用しており、通常の形状の浮体にはこうした理論の妥当性は十分に確認されているが、今回のように乾舷が非常に小さ

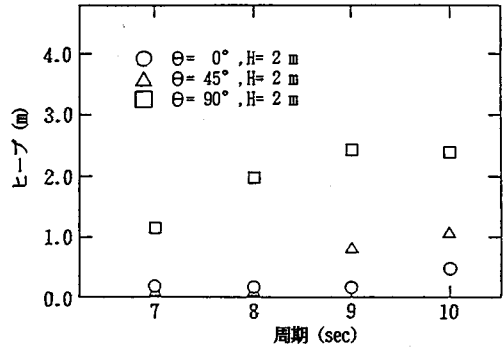


図-15 波向の違いによるヒープの振幅

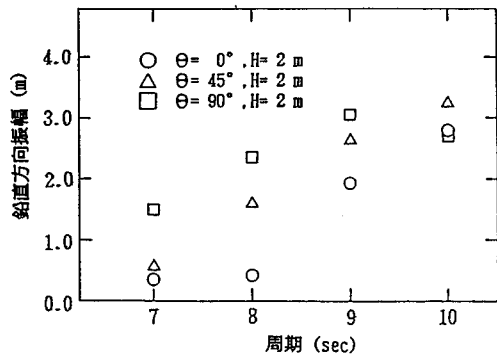


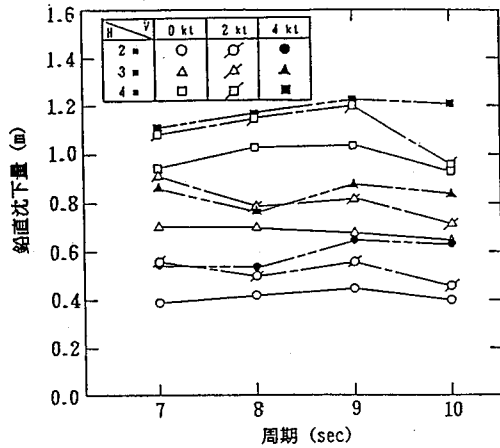
図-16 着目点Aの鉛直方向振幅

い場合の甲板への波の打ち上げおよび甲板上での砕波、これに伴う見掛けの函体重量の増加等の強い非線形性を有する現象は線形理論では説明できない。

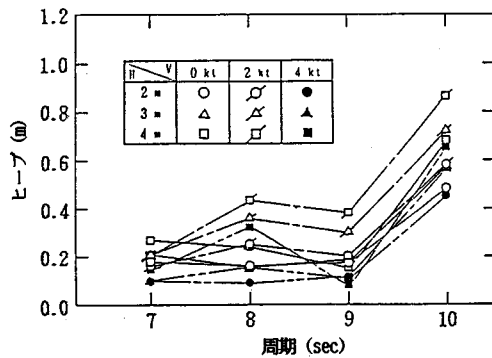
これに対し、サージの動揺量については、両者は比較的良い一致を示している。これは、水平方向の動揺であるサージは鉛直方向の動揺（ヒープ、ピッチ）と異なり函体上面への波の打ち上げによる影響が少なかったものと考えられる。

図-15は入射波の波向の違いによるヒープの動揺振幅値を示したものである。縦波、斜波に比べ横波中 ($\theta = 90^\circ$) での函体の挙動は大きく、波高と同程度の振幅で動揺していることがわかる。また、ここには示していないが横波中のロールの動揺両振幅は $H=2\text{m}$ で最大約 6 (deg) であった。横波中の場合、入射波の波長に比べ函体の吃水は相対的に小さく、かつ横幅も小さいことより、函体は波高にほぼ比例した動揺を行っており、横揺れ角も波の最大傾斜角に近い動きを示すためと思われる。しかし、沈下量に関しては波周期と上下揺れの位相差が小さいため、水を被る割合も少なく、縦波中に比べ沈下量は小さいことが確認されている。

図-16は波向の違いによる着目点A (図-8参照)



図一七 曳航速度の有無による鉛直沈下量

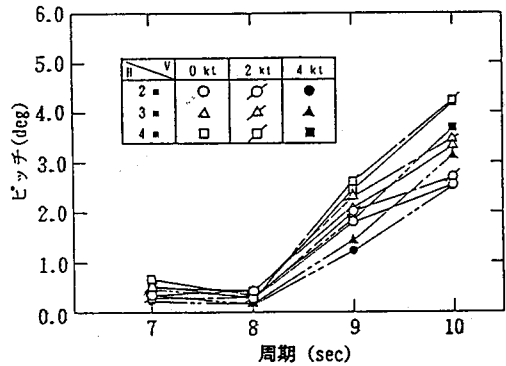


図一八 曳航速度の有無によるヒープの振幅

の鉛直方向の動揺両振幅を示したものである。いずれのケースも周期が長くなるにつれ動揺両振幅は増加しているが、特に、縦波、斜波の場合、図一12の重心点のヒープの動揺に比べ振幅値、増加率とも大きく、函体重心位置を中心とした函体端部の鉛直方向の揺れが顕著であることを物語っている。

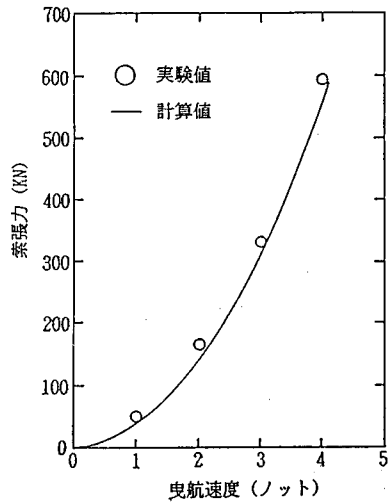
次に、函体が曳航速度を有する場合とない場合での鉛直沈下量を比較したものを図一17に示す。沈下量は前述の曳航速度のない場合(図一11)と同様、波高の影響が大であるが、曳航速度の増加によっても沈下量は増してくる。これは、曳航速度により函体は次々に波を被り没水状態から浮体状態に遷移する時間が短く必然的に甲板に載る水の量が大きくなるためと思われる。また、曳航速度が増すと函体が前のめりになる現象が静水中曳航実験で確かめられており、この現象による水量の増加も一因であると思われる。沈下量は概略、波高の20~30%である。

図一18, 19は曳航速度の違いによるヒープとピッチ



図一19 曳航速度の有無によるピッチの振幅

S ; 浸水面積
V ; 速度



図一20 静水中曳航実験結果

の振幅値を示したものである。振幅値は4, 0, 2ノットの順で大きくなる傾向にあるが顕著な差異はみられない。

実験ではこのほかに、向かい波と追い波状態での運動量および索張力を計測しているが、いずれの値も向かい波状態の方が大きく、函体曳航に関しては向かい波の方が厳しいという結果を得た。

b) 曳航索張力

図一20は静水中曳航実験による索張力の結果と流水中の固体の受ける形状抵抗力、摩擦抵抗力の計算値と比較したものである。沈埋函エレメントのような blunt body の流水抵抗についてはまだ定説はないが、沈埋函曳航力の算定で一般的に用いられる次式³⁾より計算した。

形状抵抗力 R_D (kN)

$$R_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \omega \cdot A \cdot V^2$$

ここに、 C_D ：抗力係数 ($C_D=1.4$ とした)

ω ：水の単位体積重量

A ：被曳航物の断面積

V ：速度

摩擦抵抗力 R_F (kN)

$$R_F = \frac{1}{1000} \cdot \delta \cdot g \cdot \mu \{1 + 0.043(15 - t)\} \cdot S \cdot V^{1.825}$$

ここに、 δ ：水の比重

g ：重力加速度

$$\mu = 0.1392 + \frac{0.258}{2.68 + L} \quad (L: \text{函体長})$$

t ：水の温度 (通常 15°C)

S ：浸水面積

V ：速度

この図より、形状抵抗と摩擦抵抗を加えた流水抵抗力は実験値を良好に推定している。

静水中曳航実験では沈埋函の特徴的な挙動として前述の前のめり現象がみられた。図-21はその現象を表わした実験記録であり、曳航速度と前のめり量を示したものである。前のめり量はそれほど大きくはないが、曳航速度が速くなると二次曲線的に増加する傾向を示している。

次に、波浪中曳航の場合の索張力は、これらの形状抵抗、摩擦抵抗のほかに波浪による波漂流力および残余抵抗が付加張力として作用することになる。ただし、被曳航物体の残余抵抗は他の抵抗に比べ無視できるほど小さい。

ここで、波浪中曳航時の索張力に関して、最も重要な外力である波漂流力については、丸尾による規則波中の二次元浮体に対する理論式が良く知られており、その有効性も確認⁴⁾されている。また、木暮ら⁵⁾は不規則波中

における係留模型を用いて、チェーン張力から波漂流力を求め、丸尾の式から逆算した波高と実験波の波高を比較している。これによると、不規則波群中の波漂流力の最大値は丸尾の式の入射波振幅として有義波の値を用いれば推定できることを示している。そこで、本実験の索張力結果は規則波中のものであるが、その実験波高 H を不規則波の有義波高 $H_{1/3}$ であると仮定することより、規則波実験から得られる波漂流力は線形であるとはいえないが、波高 H に対する不規則波中の波漂流力におおむね相当しているものと思われる。

今回の実験では、波漂流力の計測は行っていないが、ワイヤにかかる索張力として直接、リング式張力計で測定した。したがって、本実験結果は先の形状抵抗力、摩擦抵抗力および波漂流力を含んだものと考えられる。

図-22は波浪中曳航実験での索張力の実験記録である。実験結果を整理するうえで、索張力として平均値を用いた。これは、曳船の曳引力の測定法⁶⁾において、使用する索の種類によって曳引力の最大値、最小値の現れ方が異なることより、曳引力はその平均値をもって示されることによる。

図-23は波浪中曳航実験での索張力の値をプロットしたもので、縦軸に全張力、横軸には波高対波長比、つまり波形勾配 H/λ をとり整理したものである。これより、波形勾配が大きくなるほど、曳航速度が速いほど張力は増加することがわかる。これについては、菅井の研究⁷⁾にみられるように、ある決まった波長の波に対して、

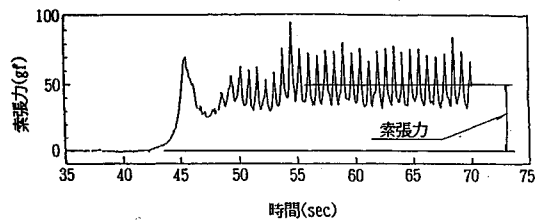


図-22 索張力の実験記録

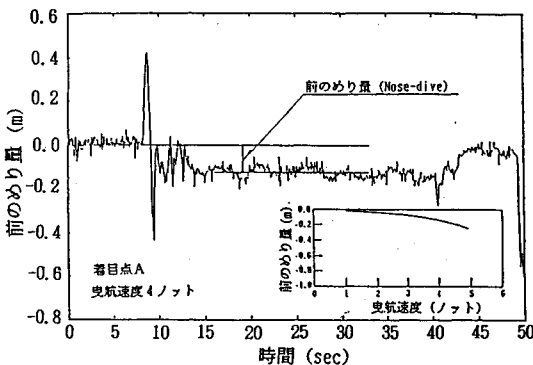


図-21 前のめりの実験記録 (静水中曳航実験)

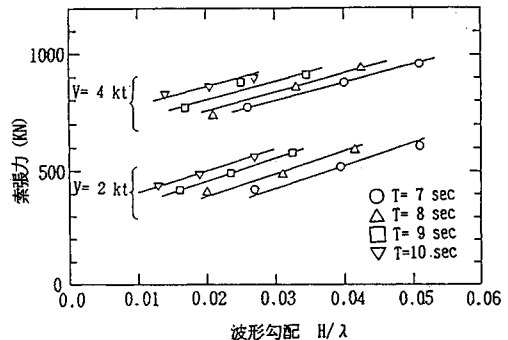


図-23 波浪中曳航実験結果

波浪中の抵抗増加分（波浪中の全抵抗と静水中の全抵抗の差）は曳航速度によらず波高による波漂流力が、形状抵抗力の増加分は曳航速度の増加が、寄与するものと思われる。

本来、索張力特性を実験で確認する場合、実際の曳索の相似モデル（長さ、重量、剛性等）を使用して実験をすべきであるが、今回の実験の主眼は索張力の概略を知り、曳船、曳索の選定の尺度とすることであったため、最終的に採用された曳索の条件とは相似にはなっていない。したがって、索張力の最大値、最小値の出力変動は実際のものとは異なることが予測されるが、実験で得られた索張力は実際の曳航時に発生する平均的な索張力をおおむね評価しているものと思われる。また、実施工の場合、函体は曳船で曳航され、曳船自体がいわばダンパー²⁾の役目をするため、曳索は適当に長く、また水中に垂下しているため、曳航台車による強制曳航に比べ、衝撃的な索張力変動が緩和され、動的影響は小さいものと考えられる。

5. 外洋曳航の可能性と作業限界条件の検討

海洋工事では、気象・海象の自然条件が構造物の安定性および作業性に大きな影響を及ぼす。したがって、限られた稼働日数内で海上の工事を円滑に実施するには、作業の限界条件を見極めることが重要であり、ひいては施工の可能性にもかかわってくる。

曳航作業を行ううえでの限界条件は、波浪による沈埋函の動揺安定性、曳航設備の安全性を含め総合的に判断し、決定する必要がある。ここでは、今回の実験で得られた動揺特性および索張力特性をもとに、作業の限界条件と外洋曳航の可能性について検討する。

まず、動揺特性結果から検討すると、今回の実験で動揺特性上、特徴的な現象として函体への波被り現象が挙げられる。入射波高の大きい条件の実験では函体が徐々に沈下し没水するケースもみられた。ここで、函体の曳航が可能かどうかに関しては、曳航タグの能力、曳索を含めた曳航装置の耐力、波浪に対する函体の耐力、および函体の水密性が十分に確保されていれば、没水状態での曳航も可能であり、基本的には支障はないものと考えられる。しかしながら、構造物の保安および曳航作業を安全に行うための施工管理上の見地からは、

- 函体の破損および漏水による函体の挙動や乾舷の変化
- 曳航装置の安定性
- 漂流物や他の船舶等からの衝突回避

等に注目し、万一の非常時に対応できるよう管理する必要がある。そのためには、函体が目視できる程度に浮上した状態で曳航することが望ましい。これより、動揺面

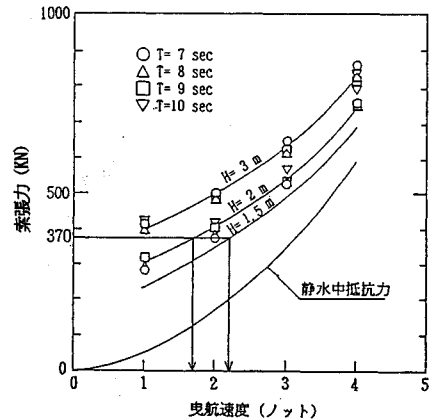


図-24 波高別の曳航速度と索張力

からみた作業の限界条件を、波浪中曳航時においても函体を浮上している状態に維持できることが条件とし、その条件を

鉛直沈下量+ヒープの片振幅 \leq 乾舷=60 cm

と定義すると、実験結果の図-17, 18より波浪限界は波高2 m以下といえる。

次に、索張力結果から限界条件を検討する。

図-24は波高別による曳航速度と曳索に作用する全張力の関係曲線である。本図は図-23をもとにして作成したもので、その方法について簡単に説明する。曳航海域は深海域であるため、波長 λ は波周期 T により一義的に決まる。次に、波高 H を設定し、各周期ごとの H/λ に対応する索張力を図-23より読み取り、張力の増加傾向は静水中曳航実験結果に従うものとして再プロットしたものである。

曳航計画は発注者、曳航業者、保険会社の同意のもとに作成されるが、ここでは、曳航業者の提示している50tボラードブル曳船の場合の限界条件を推定する。なお曳索を含めた曳航装置の選定および強度検討は、使用曳船の能力が決まれば、その曳船のDed pullが索にかかる最大荷重として設計されるが、設計の詳細は本論文の本意でないので省略する。

今、曳航のために生ずる機関回転数の低下によるロスを25%とした場合の有効ボラードブルは、

有効ボラードブル $=0.75 \times 50 \text{ t} = 37.5 \text{ t} (\approx 370 \text{ kN})$

となる。したがって、図-24より波高2 mの場合、曳航速度は1.7ノット以下、波高1.5 mでは曳航速度2.2ノット以下であれば曳航可能である。その場合の曳航時間はそれぞれ約29時間および22時間であり、目標としている曳航時間30時間を満足する。

これより、今回の実験で得られた動揺特性および索張力特性結果から作業限界波高は有義波高で2 m以下と推定される。ここで、本海域の未超過確率50%に対応

する有義波高が1.5 mであることを考えると、この値は、曳航作業の稼働日数に関して、工程上、十分満足できる値であるといえる。

6. ま と め

以上、波浪条件の厳しい外洋における函体曳航の可能性の検討にあたり、模型による曳航実験を実施し、その結果について述べてきたが、これらをまとめると下記のようなになる。

(1) 沈埋函の乾舷が小さいことより、入射波高の大きいケースでは、函体頂面に波が被り沈下していくという特徴的な現象が確認された。この現象による函体の鉛直沈下量は、波高および曳航速度が増すにつれ大きくなるが波周期にさほど影響されない。沈下量は概略、波高の20~30%であった。

(2) 鉛直方向の動揺であるヒープ、ピッチは、波被り現象により動揺が抑制されるものと考えられ、実験値と線形理論による計算値の比較においては、計算値は動揺量を過大に評価していた。

(3) 横波中での函体の動揺量は縦波、斜波に比べ大きく、ヒープは波高と同程度の振幅で動揺する。しかし、沈下量に関しては、波周期とヒープの位相差が小さいため、水を被る割合も少なく、縦波中に比べ沈下量は小さい。

(4) 曳航速度が増すと函体が前のめりになる現象が確認された。前のめり量はさほど大きくないが、速度が速くなると二次曲線的に増加する傾向を示した。

(5) 形状抵抗と摩擦抵抗を加えた流水抵抗力の計算値は静水中曳航実験で得られた索張力の実験値を良好に推定していた。また、波浪中曳航時の索張力は波形勾配が大きくなるほど、曳航速度が速いほど張力は増加する。

(6) 動揺特性および索張力結果より、曳航作業の限界条件は有義波高で2 m以下と推定される。

7. あとがき

本実験は、沈埋函の外洋曳航に対する可能性および問

題点を探るための preliminary の実験であった。その結果、外洋曳航は十分可能であることが確認されたが、函体の挙動においては函体頂面に波が被り沈下するという特徴的な現象がみられた。この現象に伴う函体の運動は現在一般に使用されている線形理論ではうまく説明ができない。このため、波の打ち上げおよび甲板上での碎波これに伴う見掛けの函体重量の増加等の非線形性を考慮した解析が望まれ、今後の検討課題といえる。

なお、第1函目の函体曳航は1989年11月末に行われ、50 t ボラードブルの主曳船を用いて無事終了した。施工の詳細については、別の機会にご報告させていただきたいと考えている。

最後に、本報告をまとめるにあたり、(株)熊谷組豪州支店の山崎 晶氏に多大なる協力をいただいた、ここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) "Nearshore Oceanography and Morphodynamics of the Broken Bay-Palm Beach Region NSW", Sydney University Coastal Studies Unit, Technical Report No. 80/1.
- 2) 山崎 晶：浮体の対称性を利用したグリーン関数計算の効率化, 土木学会論文集, 第405号, pp. 255~258, 1989. 5.
- 3) 首都高速道路公団編：東京港トンネル工事誌, 土木学会, pp. 378, 1977.
- 4) 野尻信弘・村上敬一：規則波中の2次元浮体に働く漂流力に関する研究, 西部造船会会報第51号, pp. 141, 1975. 11.
- 5) 木暮健一郎・鈴木康正ほか：浮防波堤に作用する波漂流力について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 440~444, 1983.
- 6) 引船の基本設計指針, 日本作業船協会発行, pp. 114, 1985.
- 7) 菅井和夫：自己昇降式海上作業台船(マット付)模型の波浪中曳航試験, 船舶技術研究所報告, 第8巻, 第4号, pp. 67~69, 1971.
- 8) 原 正一・山川賢次・星野邦弘：平水中曳航時の索張力について, 船舶技術研究所研究発表会講演集 pp. 90~93, 1988. 12.

(1990. 4. 6・受付)